

LASERSKO VARJENJE LAKIRANE BAKRENE ŽICE NA PRIKLJUČNICE ELEKTROMOTORJA

LASER WELDING OF VARNISHED COPPER WIRE ON AN ELECTROMOTOR CONNECTION

Aleš Babnik¹, Boštjan Zajec², Janez Možina¹

¹ Katedra za optodinamiko in lasersko tehniko, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, Aškečeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija

² ROTOMATIKA, Spodnja Kanomlja 23, 5281 Spodnja Idrija; Slovenija
ales.babnik@uni-lj.si

Prejem rokopisa - received: 2001-01-15; sprejem za objavo - accepted for publication: 2001-04-24

Del proizvodnega procesa izdelave elektromotorjev je spajanje lakirane bakrene žice navitja na priključnice tuljavnika. Klasični načina spajanja z lotanjem zahteva posebno predpripravo koncev navitja in je ekološko oporečen. Oba problema sta rešljiva z laserskim varjenjem. Prispevek obravnava snovanje in izdelavo avtomatskega sistema za lasersko varjenje tuljave malega asinhronskega elektromotorja. Parametri varilnega laserskega žarka so bili eksperimentalno določeni glede na videz zvara, metalografsko preiskavo in porušni tokovni preizkus. Razvit je bil podsistem za določanje položaja navojev žice na priključnici in nastavljanje varilnega žarka na mesto obdelave

Ključne besede: lasersko varjenje, lakirana bakrena žica

Welding of a varnished copper wire on an electromotor-coil connection is part of the manufacturing of electromotors. The currently used technique is soldering, which requires special treatment of the winding ends and is ecologically problematic. Both problems can be solved with laser welding. This article presents a design for an automated system for laser welding of an asynchronous electromotor coil. Welding-beam parameters were experimentally determined with a visual and metallographic inspection of the weld and a destructive current test. A subsystem for locating the position of a wire end on the connector and the welding spot positioning was developed.

Key words: laser welding, varnished copper wire

1 UVOD

Klasični postopek pritrdjevanja bakrene izolirane žice na medeninasto priključnico je lotanje, ki zahteva pripravo koncev navitja. Lakirano prevleko na bakreni žici navadno odstranimo s primernimi topili. Tak postopek je v uporabi tudi v podjetju YDRIA MOTORS, kjer izdelujejo majhne elektromotorje. Zaradi uporabe topil in raztaljenega cina je lotanje ekološko oporečen postopek.

Proizvodni program omenjenega proizvajalca obsega tudi elektromotorje, namenjene za delovanje pri povišanih temperaturah. Odstranjevanje temperaturno obstojnega laka ni možno s topili, temveč ga odstranjujemo ročno in je zato ozko grlo v proizvodnem procesu.

Lasersko varjenje je sodoben postopek, ki omogoča časovno in krajevno natančno dovajanje energije na mesto vara. Postopek je predvsem primeren za varjenje materialov majhnih dimenzij in velikih toplotnih prevodnosti, katerih površina je lahko onesažena (oksid, barva)^{1,2}. Pravilna izbira parametrov laserskega žarka omogoča varjenje lakirane bakrene žice majhnega premera na pokositrano medeninasto priključnico brez predhodne mehanske obdelave koncev žice. Cilj našega dela je bil določiti te parametre in zasnovati samodejen laserski varilni sistem.

2 EKSPERIMENTALNI SISTEM

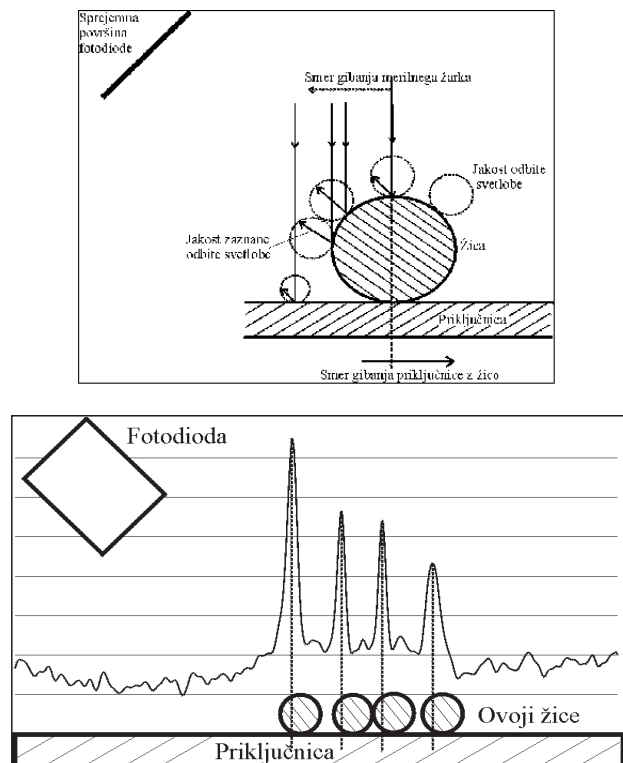
Kot osnovo eksperimentalnega sistema smo uporabili komercialni Nd-YAG varilni laserski izvir (proizvajalec FOTONA) brez preklopnika kvalitete, kateremu je možno nastavljati izhodno energijo in trajanje laserskega bliska. Izviru smo dogradili optični sistem za nastavljanje varilnega žarka na mesto obdelave.

2.1 Optični sistem za nastavljanje varilnega žarka

Sistem služi za določanje lege žice na priključnici oziroma predvidene lege zvara in usmerjanje varilnega žarka na to mesto. Uporabili smo nedotično metodo detekcije odboja svetlobe s površine obdelovanca, ki ga osvetlimo s premikajočim se merilnim laserskim žarkom He-Ne. Načelo delovanja prikazuje **slika 1**. Preverili smo delovanje dveh izvedenk optičnega detekcijskega sistema.

Prvi sistem je osnovan na mehanizmu z odklonskimi zrcali (**slika 2**), kjer je potrebno zagotoviti soosnost merilnega in varilnega žarka. Sistem omogoča veliko hitrost določanja lege tako priključnice kot tudi ovojev žice na njej, vendar zahteva obsežen mehanski poseg v konstrukcijo varilnega laserja.

Pri drugem sistemu se pomika varjenec pod mirujočim merilnim žarkom (**slika 3**). Sistem omogoča določitev lege ovojev žice na priključnici, medtem ko



Slika 1: Načelo delovanja optičnega senzorja za določitev lege žice na priključnici (zgoraj) in signal optičnega senzorja glede na lego ovojev žice (spodaj)

Figure 1: Principle of determining the position of the wire on the coil connection with an optical sensor (up) and optical sensor signal correlation with the position of the windings (down)

mora pravilno lego priključnice zagotoviti primerno oblikovan nosilec obdelovanca. Soosnost varilnega in merilnega žarka ni več potrebna. Po končanem določanju lege pomaknemo obdelovanec pod varilni žarek in izvršimo postopek varjenja. V pomiku x je poleg razdalje med merilnim in varilnim žarkom zajet tudi eksperimentalno določen zamik varilnega žarka proti bakreni žici x_z , ki zagotavlja najmanjšo poškodbo slednje. Sistem odlikuje enostavna dograditev v že obstoječo proizvodno linijo.

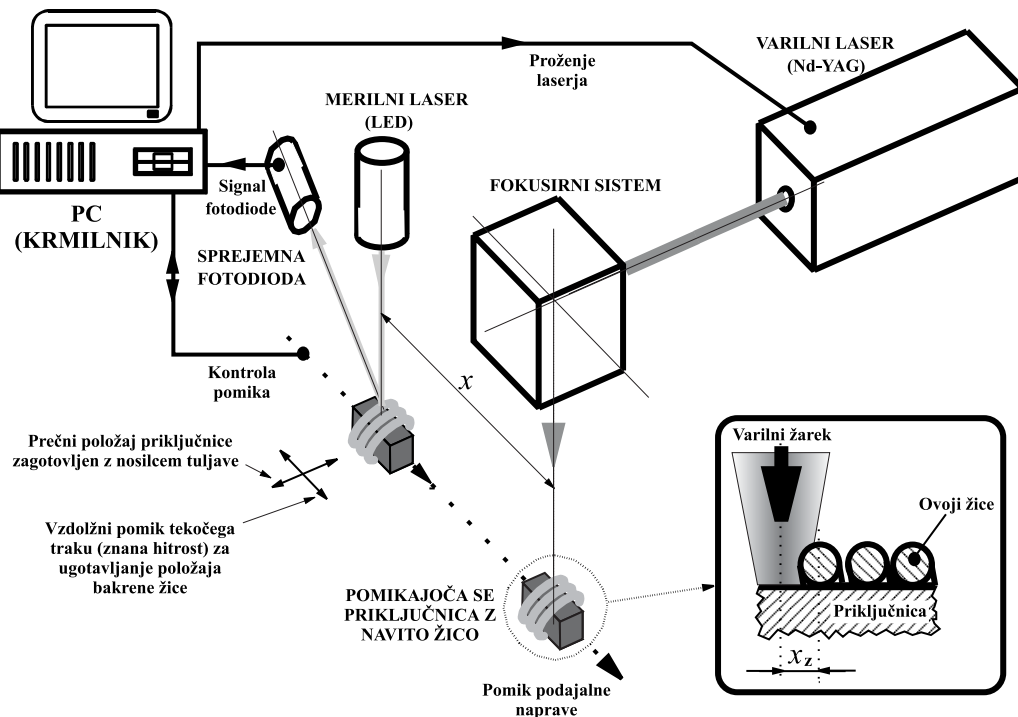
3 EKSPERIMENTI

Za zadostitev zahtev po samodejnem delovanju sistema in potrebni kvaliteti spojev je bilo potrebno:

- določiti optimalne lastnosti varilnega laserskega žarka glede na material in dimenzije varjencev (energijo in trajanje bliska, premer žarka na mestu vara)
- preučiti pripravo obdelovancev ter določiti optimalno mesto vara glede na bakreno žico, navito na priključnici
- izsledke uporabiti pri zasnovi in izdelavi sistema za samodejno nastavitve žarka na mesto varjenja oziroma zasnovi krmiljenja celotnega varilnega sistema.

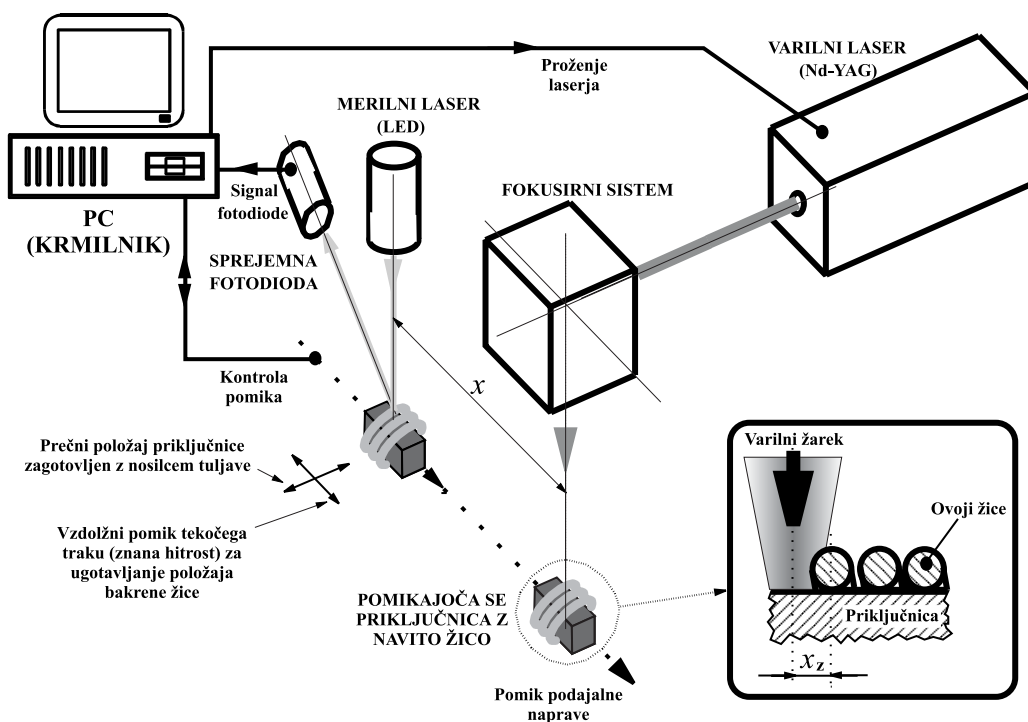
3.1 Določitev optimalnih lastnosti varilnega žarka

Poskusi so bili izvedeni z ročnim nastavljanjem varjenja z osnovno izvedenko varilnega laserja. Varili



Slika 2: Detekcijski sistem z odklonskimi zrcali

Figure 2: Detection system with moving mirrors



Slika 3: Detekcijski sistem s pomikajočim obdelovancem
Figure 3: Detection system with moving workpiece

smo bakreno žico premera 0,25 mm, zaščiteno s temperaturno obstojnim lakom. Optimalne lastnosti varilnega žarka smo eksperimentalno določili s spreminjanjem energije laserskega bliska ($E = 8 \text{ J}$ do 24 J) in njegovega trajanja ($t = 5 \text{ ms}$ do 15 ms) ter premera varilnega žarka na mestu obdelave ($d = 0,3 \text{ mm}$ do 2 mm). Varilni laser dejansko omogoča spreminjanje napetosti na bliskavki U , s čimer spreminjamo povprečno moč laserskega bliska. Ker laser nima vgrajenega merilca energije svetlobnega bliska, smo slednjo posredno izrazili iz moči in trajanja laserskega bliska³. Os varilnega žarka smo zamikali glede na žico na priključnici do vrednosti, enake premeru varilnega žarka.

Kakovost varov smo preverjali sprti z vizualnim opazovanjem. Kot merilo za kakovost smo privzeli poškodbo žice oziroma njen pretrg in prekritost žice z varom, kar je razvidno iz slike 4. Z mikroskopiranjem metalografskih obrusov preseka varov pa smo ugotavljali vpliv varilnih parametrov in vpihovanja zaščitnega plina (argon) na pojav zaostale vmesne plasti oksida oziroma odstranjene lakirane izolacije (slika 5).

Najboljše rezultate smo dosegli s parametri $U = 400 \text{ V}$, $t = 7 \text{ ms}$ ($E = 14 \text{ J}$) in $d = 1,5 \text{ mm}$. Os varilnega žarka je bila za $0,5 \text{ mm}$ premaknjena izven središčnice žice. Splošne ugotovitve, ki so neodvisne od premera žice in vrste izolacije, so naslednje:

- pravilna nastavitve časa bliska bolj vpliva na kakovost vara kot nastavitve moči žarka
- obvezno je tesno navijanje žice na nastavek priključnice

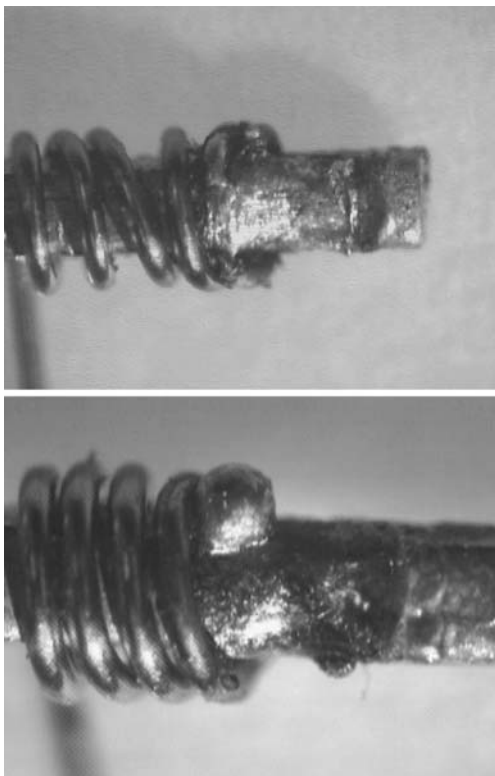
- nastavitve varilnega žarka glede na žico na priključnici (x_z) bistveno vpliva na kvaliteto vara
- varjenje pod zaščitnim plinom zadrži nastanek oksidne plasti.

S preučevanjem optičnih signalov detekcijskega sistema glede na videz merjenca smo ugotovili, da je možno s sistemom točno določiti lego ovojev, kot tudi nadzorovati število in tesnost ovojev žice na priključnici.

3.2 Kontrola varjenih spojev pri samodejnem nastavljanju varilnega žarka

Meritve smo izvajali z varilnim laserjem, kateremu smo zaradi enostavnejše konstrukcijske prilagoditve dogradili optični sistem s pomikajočim se obdelovancem in mirujočim merilnim žarkom. Obdelovanec smo poizkusno pomikali s pozicionirno mizico, s čimer smo simulirali realni pomik podajalne naprave, kot je nakazan na sliki 3. Varili smo z zgoraj navedenimi optimalnimi parametri varilnega žarka.

Kontrolna meritev pod temi pogoji varjenih spojev s strani kupca motorjev je pokazala, da je vizualna kontrola varov dovolj zanesljiv način določanja kvalitete vara. Dodatno smo izvedli še kontrolo zvarov na dopustno tokovno obremenitev. V ta namen je bila izdelana serija tuljavnikov z enim ovojem žice, katere smo tokovno obremenjevali do porušitve tokokroga, ki v nobenem primeru ni nastopila na varjenem spoju žice in priključnice (tok porušitve pribl. 50 krat večji od predpisane).



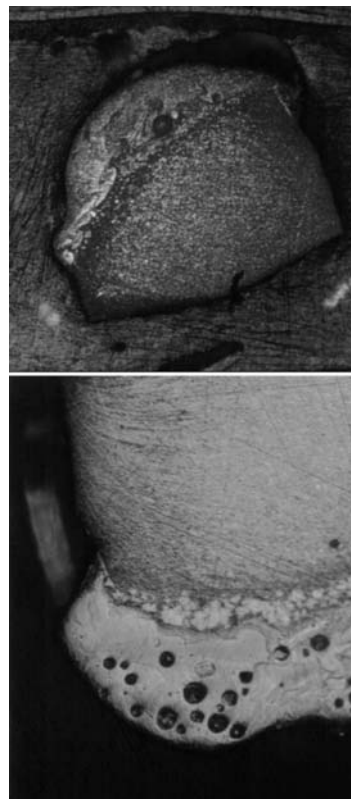
Slika 4: Vizualna kontrola zvara. Zvar na levi sliki je izveden z optimalnimi parametri žarka ($U=400V$, $d=1,5mm$, $t=7ms$). Slika na desni prikazuje zvar, ko je bil čas bliska predolg ($U=400V$; $d=1,6mm$; $t=10ms$)

Figure 4: Visual inspection of the weld. Weld on the left is made with optimal beam parameters ($U=400V$, $d=1,5mm$, $t=7ms$). Weld on right is made with longer beam time ($U=400V$; $d=1,6mm$; $t=10ms$)

4 SKLEPI

Lasersko varjenje je primeren postopek spajanja bakrene izolirane žice na medeninasto priključnico. Parametre varilnega laserskega žarka je treba eksperimentalno določiti glede na material in dimenzije varjenčev. Ključnega pomena sta čas bliska in položaj varilnega žarka glede na bakreno žico. Žica mora biti na mestu vara tesno ovita okoli priključnice.

Opazovanje odboja merilnega laserskega žarka s površine varjenca je zanesljiva nedotična metoda določanja položaja ovojev žice na priključnici. Metoda omogoča tudi preverjanje tesnosti ovijanja žice in števila ovojev na priključnici.



Slika 5: Povečava metalografskega obrusa. Zvar na levi sliki je izveden z optimalnimi parametri žarka. Slika na desni prikazuje zvar z zaostalo oksidno plastjo ($U=380V$; $d=1,6mm$; $t=10ms$)

Figure 5: Magnification of the metallographic sample. Weld on the left is made with optimal beam parameters. Picture on the right shows the weld with leftover oxide layer ($U=380V$; $d=1,6mm$; $t=10ms$)

Samodejen laserski varilni sistem z vgrajenim optičnim detekcijskim sistemom s pomikajočim obdelovancem je možno enostavno vključiti v obstoječo proizvodno linijo. Za zagotovitev pravilnega položaja tuljave med procesom varjenja uporabimo vpenjalo naprave, ki se nahaja v proizvodni liniji neposredno pred varilnim sistemom.

5 LITERATURA

- ¹ William M. Steen: *Laser Material Processing*, Springer - Verlag Berlin Heidelberg New York, 1998
- ² Walter W. Duley: *Laser welding*, A Wiley - Interscience publication, ZDA
- ³ Varilni laser WL-40, tehnična dokumentacija, FOTONA, Ljubljana